

基于热传递减法集对势的区域水资源承载力评价

吴啸骥, 吴成国, 秦广虎, 杨振龙, 赵齐雅, 金菊良

Evaluation scheme and application of regional water resources carrying capacity based on heat transfer subtraction set pair potential

WU Xiaoqin, WU Chengguo, QIN Guanghu, YANG Zhenlong, ZHAO Qiya, JIN Juliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20230721002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水资源承载力动态评价的引力减法集对势方法

Gravity based subtractive set pair potential method for dynamic evaluation of water resources carrying capacity

水利水运工程学报. 2021(2): 38 <https://doi.org/10.12170/20200402002>

半偏减法集对势在区域旱灾风险评估中的应用

Application of semipartial subtraction set pair potential method to the dynamic assessment of regional drought risk

水利水运工程学报. 2021(1): 36 <https://doi.org/10.12170/20200901005>

基于全偏确定度的区域水资源承载力动态评价

Dynamic evaluation of regional water resources carrying capacity based on full partial certainty degree

水利水运工程学报. 2019(6): 38 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.005>

黄河下游生态型引黄灌区水资源承载力研究

Study on water resources carrying capacity of ecological diversion irrigation district in the lower reaches of the Yellow River

水利水运工程学报. 2020(2): 22 <https://doi.org/10.12170/20200209001>

投影寻踪方法在水资源承载力评价与预测中的应用

Application of projection pursuit method in assessment and prediction of water resources carrying capacity

水利水运工程学报. 2020(4): 10 <https://doi.org/10.12170/20190609002>

基于AHP-集对分析的矿井水资源利用风险评估

Risk assessment of mine water resource utilization based on analytic hierarchy process and set pair analysis

水利水运工程学报. 2021(3): 126 <https://doi.org/10.12170/0201120002>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20230721002

吴啸骏, 吴成国, 秦广虎, 等. 基于热传递减法集对势的区域水资源承载力评价[J]. 水利水运工程学报, 2024(3): 62-71. (WU Xiaoqin, WU Chengguo, QIN Guanghu, et al. Evaluation scheme and application of regional water resources carrying capacity based on heat transfer subtraction set pair potential[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(3): 62-71. (in Chinese))

基于热传递减法集对势的区域水资源承载力评价

吴啸骏¹, 吴成国^{1,2}, 秦广虎¹, 杨振龙¹, 赵齐雅¹, 金菊良^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为有效评估区域水资源承载力系统演变特征并诊断脆弱性影响因素, 引入物理学热传递思想, 在集对分析传统减法集对势基础上进一步深化确定性项和不确定性项之间的势差概念, 构建了基于热传递减法集对势的区域水资源承载力评价方法, 并应用于安徽省江淮丘陵区。结果表明: 2011—2018年安徽省江淮丘陵区除合肥市外, 其余地市水资源承载力水平整体有所改善, 合肥市水资源承载力等级较低; 人均水资源量、产水模数、生态用水率等因素是影响安徽省江淮丘陵区水资源承载力变化的重要脆弱性因素。整体而言, 本文计算分析结果与传统减法集对势及半偏减法集对势计算结果基本一致, 这表明构建的基于热传递减法集对势的水资源承载力评价方法计算结果合理有效, 且丰富和发展了集对势的内涵, 可为开展区域水资源承载力评价及脆弱性因素识别提供新的研究途径。

关键词: 水资源承载力评价; 减法集对势; 热传递减法集对势; 江淮丘陵区

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)03-0062-10

水资源是人类、经济社会发展和生态环境保护的基础, 水资源承载力是指一个特定区域在一定时间范围内, 经综合考虑水资源数量和质量、环境承载力及经济社会因素后, 所能承载的水资源利用量和质的上限, 是制定水资源管理政策和水利规划的重要依据^[1-2]。可根据水资源承载力进行水资源管理, 在管理中落实可持续性原则, 从而达到合理调配、协调开发、维持平衡的目的^[3]。近年来, 区域水资源承载力研究方法有主成分分析法^[4]、模糊综合评价法^[5]、系统动力学法^[6]、灰色关联法^[7]、投影寻踪法^[8]、集对分析法^[9-21]等。其中, 集对分析法^[17-21]因能定量评估水资源承载力, 准确反映评价指标和评价标准之间的确定性和不确定性关系, 开始应用于水资源承载力分析评价中。Zhou等^[12]通过将熵理论和联系数相结合, 构建了水资源承载力预警模型; Pan等^[13]提出了基于联系熵的变化环境下水资源系统脆弱性评价方法; Cui等^[14]综合熵权法和改进的层次分析法确定水资源承载力评价指标的权重, 建立了基于联系数的区域水资源承载力评价和诊断模型; Jiao等^[15]根据区域用水的实际情况, 提出了一种基于集对分析的评价标准构建方法; Lu等^[16]通过熵权集对理论来评估所涉及的不确定性, 对地区水资源可持续利用进行了评价; 金菊良等^[17]在联系数基础上提出了减法集对势这一伴随函数, 并将其应用于水资源承载力脆弱性指标识别中; 吴凡等^[18]构建了模糊集对评价模型, 结合五元减法集对势对新疆15个地州水资源承载力进行评价并诊断其发展态势; 金菊良等^[19]提出引力减法集对势, 应用于水资源承载力分析评价。上述关于集对势计算原理及其应用的现有研究成果, 未能考虑确定性项和不确定性项之间转化时的势差影响, 即确定性项和不确定性项之间量的差距。

收稿日期: 2023-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2240223, 52109009); 安徽省自然科学基金资助项目(2208085US03, 2208085QE179, 2108085QE254); 安徽省高等科研计划重点项目(2022AH051105)

作者简介: 吴啸骏(1999—), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 主要从事水资源系统工程研究。
E-mail: 1303880190@qq.com 通信作者: 吴成国(E-mail: wule9825@163.com)

本文在传统减法集对势的基础上,考虑联系系数中不确定性项转化到确定性项上的可能难度,认为不确定性项和确定性项的转化存在势差的影响。基于物理学中热传递的转化理论,将不确定性项向确定性项的转化值视为物体间相互传递的热量,将两者间可能存在的势差视为物体间的温度差,提出基于热传递减法集对势的区域水资源承载力评价方法,并于安徽省江淮丘陵区开展实证应用研究,将现有不同类型集对势方法计算结果与本文提出的方法计算结果进行对比分析,验证热传递减法集对势计算方法的有效性。

1 热传递减法集对势

热传递公式 $Q=\alpha A\Delta T$ ^[22],是根据热传导定律,通过对传热介质的温度差、热导率和导热面积等因素的量化描述,来计算热传递过程中的热量传递量;其中 α 为导热系数, A 为导热面积, ΔT 为物体之间的温度差。

集对分析法^[9]以联系系数从同、异、反三个方面,探讨水资源承载力中评价样本与等级标准间的不确定性关系,而集对势^[9]是联系系数的一种伴随函数,能描述集对分析联系系数中研究对象在宏观上的确定性状态及相对确定性发展趋势,可根据集对势识别诊断评价结果中的脆弱性指标,分析发展态势。

金菊良等^[17]提出了三元减法集对势:

$$s_1(u) = (a-c)(1+b) = a-c+ba-bc \quad (1)$$

式中:减法集对势是根据 a 、 c 所占比重将 b 转化为 a 和 c ,本文考虑不确定性项转化到确定性项上的可能难度,认为不确定性项和确定性项的转化存在势差的影响,基于物理学中热传递的转化理论,将不确定性项向确定性项的转化值视为物体间相互传递的热量,将两者之间可能存在的势差视为物体之间的温度差,进一步提出热传递减法集对势:

$$s_2(u) = a-c+ba \left[(a-b)^2 + \left(1 - \frac{b}{a+b} \right)^2 \right]^{0.5} - bc \left[(c-b)^2 + \left(1 - \frac{b}{c+b} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (2)$$

式中:考虑不确定性项和确定性项之间的势差因素,将不确定性项和确定性项之间的转化值类比于热传递过程中的热量传递量,以差异度项转化为同一度项这部分为例,其中 a 对应 $a/(a+b+c)$,表示为 b 向 a 的转化率,可类比为导热系数 α ; b 为待转化值,可类比为导热面积 A ;文献[14]中采用 $|a-b|$ 作为状态间的距离值,本文则认为同一度项和差异度项处于一坐标轴上, a 和 b 分别为同一度项和差异度项的竖向长度,考虑将 $|a-b|$ 当作平面上不确定性项和同一度项间的纵向势差, $b/(a+b)$ 表示 b 所占比重,同一项 a 和差异度项 b 之间的横向距离为 1,以 $1-b/(a+b)$ 作为横向势差,再根据勾股定理公式,得 $[(a-b)^2 + (1-b/(a+b))^2]^{0.5}$,作为 a 和 b 状态之间的势差值,类比传热介质之间的温度差,然后三部分依次相乘,最终得到差异度项 b 向同一度项 a 的转化值,类比于热传递公式中的热流量 $Q=\alpha A\Delta T$ 。同理可得差异度项 b 向对立度项 c 的转化值 $bc[(c-b)^2 + (1-b/(c+b))^2]^{0.5}$,根据原有减法集对势,最终构建了热传递减法集对势的计算公式。

由式(2)可知,热传递减法集对势取值范围为 $[-1, 1]$,参考减法集对势的均分原则^[23-25],划分为 5 个势级:反势 $\in [-1.0, -0.6)$,偏反势 $\in [-0.6, -0.2)$,均势 $\in [-0.2, 0.2]$,偏同势 $\in (0.2, 0.6]$,同势 $\in (0.6, 1.0]$ 。依据热传递减法集对势值的大小,判断其所处势级状态,进而判断该指标是否是导致区域水资源承载力变低的主要因素,并且可判断该指标是否需要重点调控。与减法集对势相比,热传递减法集对势考虑到不确定性转化到确定性的可能性,增加势差这一项值,类比于物理中热传递的思想,考虑更加细化、完整,有助于丰富减法集对势的内涵。本文将热传递减法集对势分别与减法集对势、半偏减法集对势两种方法进行模拟计算对比,计算出两者之间平均绝对误差,计算公式如下:

$$d_1 = \sum_{m=1}^M |s_2(u_m) - s_1(u_m)| \quad (3)$$

$$d_2 = \sum_{m=1}^M |s_2(u_m) - s_3(u_m)| \quad (4)$$

式中: M 为模拟联系数次数; $s_1(u_m)$ 、 $s_2(u_m)$ 、 $s_3(u_m)$ 分别表示减法、热传递减法和半偏减法集对势。本文模拟 10^4 、 10^5 和 10^6 次时, 其平均绝对误差 d_1 和 d_2 分别约 2.6% 和 2.7%, 这说明了热传递减法集对势公式的合理性。

2 区域水资源承载力分析评价模型

参考现有的集对分析理论及方法, 建立基于热传递减法集对势的水资源承载力分析评价模型^[26], 其建模包含以下 4 个步骤:

(1) 建立水资源承载力评价指标体系, 确定相应评价等级标准^[27-32]。结合研究区域的实践调研、专家咨询、文献统计等相关成果, 建立区域水资源承载力评价指标体系 $\{x_j | j=1, 2, \dots, n_j\}$, 评价指标样本数据集为 $\{x_{ij} | i=1, 2, \dots, n_i; j=1, 2, \dots, n_j\}$, 其中, x_{ij} 为评价样本 x 中评价指标 j 的值, n_i 为评价样本数目, n_j 为评级指标数目。本文区域水资源承载力划分等级标准为 $\{s_{kj} | k=1, 2, \dots, n_k; j=1, 2, \dots, n_j\}$, 将水资源承载力分为 3 个等级: 可载(1 级)、临界超载(2 级)和超载(3 级)^[26-33], 可载代表该地区的水资源承载力情况较好, 临界超载代表地区水资源承载力情况一般, 超载代表地区水资源承载力接近饱和, 未来可能会出现水资源短缺情况。

(2) 将评价指标值与等级标准两个集合构成集对, 根据两集合接近程度这一可变模糊集, 计算出评价单指标联系数。具体公式如下:

$$u_{ij1} = \begin{cases} 1, \text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{1j} \text{ 或反向指标 } s_{1j} \leq x_{ij} \\ 1 - 2(x_{ij} - s_{1j}) / (s_{2j} - s_{1j}), \text{正向指标 } s_{1j} < x_{ij} \leq s_{2j} \text{ 或反向指标 } s_{2j} \leq x_{ij} < s_{1j} \\ -1, \text{正向指标 } x_{ij} > s_{2j} \text{ 或反向指标 } x_{ij} < s_{2j} \end{cases} \quad (5)$$

$$u_{ij2} = \begin{cases} 1 - 2(s_{1j} - x_{ij}) / (s_{1j} - s_{0j}), \text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{1j} \text{ 或反向指标 } s_{1j} \leq x_{ij} \\ 1, \text{正向指标 } s_{1j} < x_{ij} \leq s_{2j} \text{ 或反向指标 } s_{2j} \leq x_{ij} < s_{1j} \\ 1 - 2(x_{ij} - s_{2j}) / (s_{3j} - s_{2j}), \text{正向指标 } s_{2j} < x_{ij} \leq s_{3j} \text{ 或反向指标 } s_{3j} \leq x_{ij} < s_{2j} \\ -1, \text{正向指标 } x_{ij} > s_{3j} \text{ 或反向指标 } x_{ij} < s_{3j} \end{cases} \quad (6)$$

$$u_{ij3} = \begin{cases} -1, \text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{1j} \text{ 或反向指标 } s_{1j} \leq x_{ij} \\ 1 - 2(s_{2j} - x_{ij}) / (s_{2j} - s_{1j}), \text{正向指标 } s_{1j} < x_{ij} \leq s_{2j} \text{ 或反向指标 } s_{2j} \leq x_{ij} < s_{1j} \\ 1, \text{正向指标 } s_{2j} < x_{ij} \leq s_{3j} \text{ 或反向指标 } s_{3j} \leq x_{ij} < s_{2j} \end{cases} \quad (7)$$

式中: s_{0j} 、 s_{3j} 分别是各指标的 1 级和 3 级评价标准等级值的另一端临界阈值; s_{1j} 、 s_{2j} 分别是 3 个标准等级之间的阈值。对应的相对隶属度 v_{ijk}^* 的计算公式如下:

$$v_{ijk}^* = 0.5 + 0.5u_{ijk} (i = 1, 2, \dots, n_i; j = 1, 2, \dots, n_j; k = 1, 2, 3) \quad (8)$$

归一化处理, 得联系数分量:
$$v_{ijk} = v_{ijk}^* / \sum_{k=1}^3 v_{ijk}^* \quad (9)$$

评价指标值联系数:
$$u_{ij} = v_{ij1} + v_{ij2}I + v_{ij3}J \quad (10)$$

评价样本 i 的指标值联系数:
$$u_i = v_{i1} + v_{i2}I + v_{i3}J \quad (11)$$

式中: $v_{i1} = \sum_{j=1}^{n_j} w_j v_{ij1}$; $v_{i2} = \sum_{j=1}^{n_j} w_j v_{ij2}$; $v_{i3} = \sum_{j=1}^{n_j} w_j v_{ij3}$ 。

(3) 使用级别特征值法计算对应样本 i 的等级值:

$$h(i) = \sum_{k=1}^3 v_{ik} k \quad (12)$$

(4)将上述求得的评价指标值联系数、综合联系数值代入热传递减法集对势计算公式(2),得到热传递减法集对势值,分析评估水资源承载力发展态势、诊断辨识脆弱性指标。

3 实例分析

安徽省江淮丘陵地区属亚热带向暖温带过渡气候区,南北气流在此交汇,降水年际变化大,年内分配不均,是水旱灾害频发地带;水资源空间分布不均匀,且水资源供应不足,水资源短缺问题长期存在,水资源安全存在一定风险。因此合理准确评价水资源承载力,为水资源管理和调控措施制定提供科学支撑,是亟需解决的问题。

本文将基于热传递减法集对势的水资源承载力分析评价模型应用于安徽省江淮丘陵区下辖的合肥、滁州、六安、安庆等四市。根据区域水资源承载支撑力、承载压力、承载调控力相作用形成区域水资源承载状态这一机理,参考金菊良等^[23,26-28]研究构建安徽省江淮丘陵区水资源承载力评价指标体系、等级标准,运用基于加速遗传算法的模糊层次分析法确定指标权重^[32],如表1所示。相关数据来源于《安徽省统计年鉴》和《安徽省水资源公报》(2011—2018年四市所需评价指标数据,部分数据需要处理)。将上述数据代入式(5)~(12)计算出各市各年的联系数分量、评价等级值,然后将各市各年的联系数分量代入式(1)和式(2),结果如表2所示,同时将表2的四市集对势结果值绘制成图(见图1)。为识别四市水资源承载力评价中的脆弱性指标,计算出2011—2018年各指标的减法和热传递减法集对势值,结果见表3(由于篇幅限制,故列出指标仅为各市部分样本指标)。

表1 安徽省江淮丘陵区水资源承载力评价指标体系及等级标准和权重

Tab. 1 Evaluation index system and grade standard and weight of water resources carrying capacity in Jianghuai hilly region of Anhui Province

目标层	子系统	指标层	指标含义	评价标准			指标权重
				1级 (可载)	2级 (临界可载)	3级 (超载)	
水资源承载力评价	承载支撑力	人均水资源量 g_1/m^3	水资源总量/常住人口总数	$\geq 1\ 670$	[1 000, 1 670)	$< 1\ 000$	0.133
		产水模数 $g_2/(万m^3/km^2)$	多年平均水资源总量/区域面积	≥ 80	[50, 80)	< 50	0.132
		人均供水量 $g_3/(m^3/(人 \cdot a))$	供水总量/常住人口总数	≥ 450	[350, 450)	< 350	0.106
		植被覆盖率 $g_4/\%$	森林面积/土地总面积	≥ 40	[25, 40)	< 25	0.028
	承载调控力	水资源开发利用 $g_5/\%$	供水总量/水资源总量	≤ 40	(40, 70]	> 70	0.093
		人均GDP $g_6/(元/人)$	总GDP/总人口数	$\geq 24\ 840$	[6 624, 24 840)	$< 6\ 624$	0.077
	承载压力	生态用水率 $g_7/\%$	生态环境用水量/用水总量	≥ 5	[1, 5)	< 1	0.031
		人均日生活用水量 g_8/L	居民生活日用水量/常住人口总数	≤ 70	(70, 180]	> 180	0.040
		万元GDP用水量 g_9/m^3	用水总量/万元GDP	≤ 100	(100, 400]	> 400	0.079
		万元工业增加值用水量 g_{10}/m^3	用水总量/万元工业增加值	≤ 50	(50, 200]	> 200	0.060
		人口密度 $g_{11}/(人/km^2)$	常住人口总数/区域面积	≤ 200	(200, 500]	> 500	0.079
		城市化率 $g_{12}/\%$	城镇人口/总人口	≤ 50	(50, 80]	> 80	0.063
	农田灌溉定额 $g_{13}/(m^3/hm^2)$	灌溉用水量/灌溉面积	$\leq 3\ 750$	(3 750, 6 000]	$> 6\ 000$	0.079	

表2 安徽省江淮丘陵区水资源承载力评价联系数分量、评价等级、集对势值及态势结果

Tab. 2 Connection number component, evaluation grade, set pair potential value and situation result of water resources carrying capacity evaluation in Jianghuai hilly region

地市	年份	联系数分量 ^[26]			等级值	热传递减法集对势		减法集对势		半偏减法集对势	
		a	b	c		结果值	态势	结果值	态势	结果值	态势
合肥	2011	0.212	0.429	0.360	2.149	-0.184	均势	-0.212	偏反势	-0.203	偏反势
	2012	0.216	0.429	0.356	2.140	-0.173	均势	-0.200	均势	-0.191	均势

续表 2

地市	年份	联系数分量 ^[26]			等级值	热传递减法集对势		减法集对势		半偏减法集对势	
		a	b	c		结果值	态势	结果值	态势	结果值	态势
合肥	2013	0.234	0.418	0.349	2.116	-0.143	均势	-0.163	均势	-0.155	均势
	2014	0.241	0.442	0.318	2.078	-0.095	均势	-0.111	均势	-0.106	均势
	2015	0.243	0.443	0.314	2.072	-0.088	均势	-0.103	均势	-0.098	均势
	2016	0.341	0.462	0.198	1.857	0.177	均势	0.210	偏同势	0.201	偏同势
	2017	0.266	0.38	0.354	2.089	-0.110	均势	-0.122	均势	-0.115	均势
	2018	0.282	0.403	0.316	2.035	-0.042	均势	-0.048	均势	-0.045	均势
滁州	2011	0.212	0.466	0.322	2.110	-0.135	均势	-0.161	均势	-0.154	均势
	2012	0.203	0.451	0.346	2.144	-0.177	均势	-0.208	偏反势	-0.199	均势
	2013	0.235	0.455	0.311	2.077	-0.094	均势	-0.111	均势	-0.106	均势
	2014	0.296	0.475	0.230	1.935	0.081	均势	0.097	均势	0.094	均势
	2015	0.326	0.482	0.192	1.866	0.165	均势	0.199	均势	0.191	均势
	2016	0.356	0.481	0.162	1.807	0.238	偏同势	0.287	偏同势	0.277	偏同势
	2017	0.327	0.436	0.238	1.911	0.110	均势	0.128	均势	0.122	均势
	2018	0.395	0.446	0.160	1.766	0.290	偏同势	0.340	偏同势	0.327	偏同势
六安	2011	0.182	0.462	0.356	2.174	-0.214	偏反势	-0.254	偏反势	-0.244	偏反势
	2012	0.221	0.484	0.295	2.074	-0.091	均势	-0.110	均势	-0.105	均势
	2013	0.252	0.487	0.261	2.010	-0.011	均势	-0.014	均势	-0.013	均势
	2014	0.325	0.491	0.184	1.860	0.172	均势	0.209	偏同势	0.202	偏同势
	2015	0.352	0.480	0.168	1.817	0.226	偏同势	0.272	偏同势	0.262	偏同势
	2016	0.437	0.470	0.094	1.658	0.424	偏同势	0.504	偏同势	0.491	偏同势
	2017	0.399	0.451	0.150	1.751	0.308	偏同势	0.362	偏同势	0.349	偏同势
	2018	0.446	0.445	0.109	1.664	0.417	偏同势	0.487	偏同势	0.472	偏同势
安庆	2011	0.257	0.477	0.266	2.010	-0.011	均势	-0.013	均势	-0.013	均势
	2012	0.336	0.485	0.178	1.843	0.194	均势	0.235	偏同势	0.226	偏同势
	2013	0.344	0.489	0.168	1.824	0.216	偏同势	0.262	偏同势	0.253	偏同势
	2014	0.396	0.482	0.122	1.727	0.337	偏同势	0.406	偏同势	0.394	偏同势
	2015	0.394	0.478	0.129	1.736	0.326	偏同势	0.392	偏同势	0.379	偏同势
	2016	0.455	0.438	0.107	1.652	0.432	偏同势	0.501	偏同势	0.485	偏同势
	2017	0.442	0.447	0.111	1.669	0.411	偏同势	0.480	偏同势	0.465	偏同势
	2018	0.432	0.451	0.117	1.685	0.390	偏同势	0.457	偏同势	0.443	偏同势

由图 1 和表 2 可知: (1) 级别特征值法计算的江淮丘陵区域四市的水资源承载力大多处于 2 级(临界可载), 等级值在 2 左右波动。其中, 滁州市、六安市和安庆市的等级值逐渐降低, 表明三市的水资源承载力状况逐渐改善, 但尚未达到 1 级(可载)状态, 仍需关注并采取措施。合肥市 2011—2018 年的评级大多处于 2—3 级之间, 表明水资源承载力超载情况严重。2011—2016 年评价等级值有所下降, 但幅度较小, 水资源承载力状况较差; 而 2016 年开始评价等级值又突然上升, 突破 2 级阈值, 水资源承载力较差, 这表明合肥市急需采取措施改善水资源承载力状况。同时热传递减法集对势方法得出的评价结果和变化趋势与其他两种方法基本一致, 表明该方法较为符合实际。(2) 从评价态势看, 热传递减法集对势方法在四市的评价结果与其他两种方法存在细微差别。例如, 2011 年合肥市热传递减法集对势的结果值和态势与其他方法有所不同; 2016 年合肥市的评价态势也略有差异。(3) 从评价结果看, 当集对势值大于 0 时, 热传递减法集对势的曲线位于其他两条曲线下; 而当集对势值小于 0 时, 其曲线则位于上方。这表明热传递减法集对势方法在表达良好状况时较为悲观, 而在表达恶劣状况时则较为乐观。这种表达方式反映了保守的评价态度, 对于水资源承载力的分析较为有利。可见, 该方法是一种合理有效的方法。

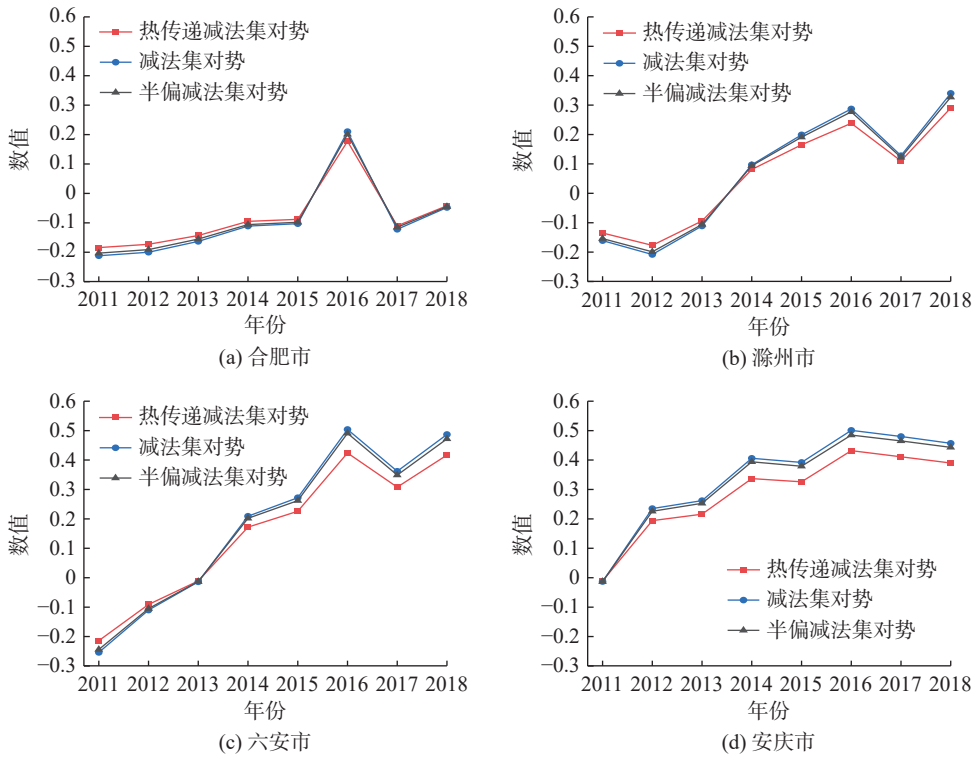


图 1 2011—2018 年四市三类集对势结果值对比

Fig. 1 Comparison of the result values of three types of sets in four cities from 2011 to 2018

由表 3 可知: (1) 合肥市人均水资源指标集对势值在 2011—2018 年始终小于-0.400, 最小值达到-0.942, 判断为合肥市水资源承载力的脆弱性指标, 这说明合肥市近几年发展迅速, 但人均水资源量已明显不足, 需加强引水工程的建设; 水资源开发利用指标在 2013 年之前集对势值小于-0.600, 2014 年开始波动上升, 且波动幅度较大, 这说明合肥市政府采取了一定措施进行调控, 但措施的实施并不严谨; 城市化率指标的集对势值在 2011—2018 年间呈下降趋势, 且在 2018 年低于-0.400, 这说明合肥城镇化进程过快, 水资源不足以支撑, 急需改善调整。(2) 滁州市人均水资源量指标从 2014 年集对势值开始波动, 且具有反复性, 需要注意并适当调整, 产水模数和生态用水率指标在 8 年间一直小于-0.300, 属于偏反势和反势态势, 可判断为脆弱性指标, 需要列为调控对象。(3) 六安市产水模数指标 2014—2018 年波动幅度较大, 需适当进行关注, 人均 GDP 和万元 GDP 用水量集对势值呈总体上升趋势, 但人均 GDP 指标值小于-0.200, 态势为偏反势, 判断为脆弱性指标。(4) 安庆市生态用水率指标虽然 2014 年和 2015 年有所回暖, 但随后 3 年波动下降, 判断为脆弱性指标。产水模数和人口密度指标虽有所波动, 但总体呈上升趋势, 故适当做出改善调整。(5) 四市部分指标集对势值的变化趋势和波动幅度基本一致, 这说明热传递减法集对势对脆弱性指标的识别比较合理, 对水资源承载力的分析评价是合适的。

表 3 2011—2018 年各市部分指标热传递减法集对势值和减法集对势值

Tab. 3 Potential value of heat transfer subtraction set and potential value of subtraction set for some indicators in cities from 2011 to 2018

年份	合肥市					
	人均水资源量 g_1		水资源开发利用 g_5		城市化率 g_{12}	
	本文方法	减法集对势	本文方法	减法集对势	本文方法	减法集对势
2011	-0.922	-0.939	-0.684	-0.795	0.016	0.020
2012	-0.904	-0.929	-0.666	-0.781	-0.057	-0.070
2013	-0.927	-0.942	-0.687	-0.797	-0.114	-0.140

续表 3

合肥市						
年份	人均水资源量 g_1		水资源开发利用 g_5		城市化率 g_{12}	
	本文方法	减法集对势	本文方法	减法集对势	本文方法	减法集对势
2014	-0.780	-0.858	0.052	0.064	-0.167	-0.205
2015	-0.789	-0.863	-0.312	-0.381	-0.221	-0.270
2016	-0.431	-0.523	0.654	0.772	-0.289	-0.353
2017	-0.877	-0.914	-0.643	-0.764	-0.359	-0.438
2018	-0.766	-0.849	-0.041	-0.050	-0.410	-0.499
滁州市						
年份	人均水资源量 g_1		产水模数 g_2		生态用水率 g_7	
	本文方法	减法集对势	本文方法	减法集对势	本文方法	减法集对势
2011	-0.534	-0.645	-0.769	-0.851	-0.874	-0.913
2012	-0.694	-0.802	-0.839	-0.893	-0.822	-0.883
2013	-0.694	-0.801	-0.837	-0.891	-0.802	-0.871
2014	-0.328	-0.400	-0.741	-0.833	-0.737	-0.830
2015	0.064	0.079	-0.687	-0.796	-0.750	-0.839
2016	0.446	0.541	-0.640	-0.762	-0.720	-0.819
2017	-0.438	-0.532	-0.750	-0.839	-0.688	-0.797
2018	0.340	0.415	-0.645	-0.766	-0.391	-0.476
六安市						
年份	产水模数 g_2		人均GDP g_6		万元GDP用水量 g_9	
	本文方法	减法集对势	本文方法	减法集对势	本文方法	减法集对势
2011	-0.741	-0.833	-0.411	-0.500	-0.599	-0.720
2012	-0.713	-0.814	-0.412	-0.501	-0.371	-0.452
2013	-0.722	-0.821	-0.414	-0.504	-0.265	-0.324
2014	-0.475	-0.576	-0.386	-0.470	-0.127	-0.155
2015	0.082	0.100	-0.308	-0.376	-0.222	-0.271
2016	0.631	0.755	-0.304	-0.372	0.154	0.189
2017	-0.644	-0.765	-0.324	-0.395	0.198	0.243
2018	-0.001	-0.001	-0.306	-0.373	0.290	0.354
安庆市						
年份	产水模数 g_2		生态用水率 g_7		人口密度 g_{11}	
	本文方法	减法集对势	本文方法	减法集对势	本文方法	减法集对势
2011	-0.639	-0.761	-0.473	-0.574	-0.433	-0.526
2012	0.098	0.121	-0.473	-0.574	-0.209	-0.256
2013	-0.091	-0.112	-0.502	-0.608	-0.212	-0.260
2014	0.500	0.605	-0.239	-0.293	-0.210	-0.257
2015	0.619	0.744	-0.230	-0.281	0.042	0.051
2016	0.854	0.902	-0.410	-0.499	0.032	0.039
2017	-0.013	-0.016	-0.416	-0.506	0.028	0.035
2018	-0.225	-0.275	-0.410	-0.499	0.034	0.042

4 结 语

本文在减法集对势的基础上,引入物理学中热传递的思想,通过类比公式提出了热传递减法集对势,具有一定的合理性,丰富了集对势的计算方式。上述方法在安徽省江淮丘陵区不同地市水资源承载力评价计算的实证应用结果表明:

(1)热传递减法集对势的计算公式相比于减法集对势,表达了确定性和不确定性之间的势差关系,含义丰富、内容完整、解释合理。

(2)2011—2018年江淮丘陵区域四市水资源承载力状况除合肥市外,整体呈上升趋势,说明各市采取措施调整了相关产业结构,使得水资源承载力状况有所改善。合肥市的水资源承载力状况不容乐观,存在下降趋势,急需采取一定措施进行调控。

(3)热传递减法集对势和减法集对势的指标态势分析变化趋势基本一致,能够诊断识别出四市中水资源承载力评价的脆弱性指标,例如:合肥市人均水资源、滁州市产水模数和生态用水率、六安市人均GDP和万元GDP用水量,都需要列为重点调控指标。同时说明热传递减法集对势方法有效,为准确识别水资源承载力评价中脆弱性指标提供了新方式,有助于丰富集对势的内涵,为水资源承载力分析评价提供了新途径。

参 考 文 献:

- [1] 金菊良,许继荣,陈梦璐,等.五元联系数的效应全偏联系及其在水问题趋势分析中的应用[J].灌溉排水学报,2021,40(9):93-101. (JIN Juliang, XU Jirong, CHEN Menglu, et al. The effect full partial connection of five element connection number and its application in trend analysis of water problems[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 93-101. (in Chinese))
- [2] DENG L L, YIN J B, TIAN J, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Han River Basin[J]. *Water*, 2021, 13(3): 249.
- [3] WANG Z G, LUO Y Z, ZHANG M H, et al. Quantitative evaluation of sustainable development and eco-environmental carrying capacity in water-deficient regions: a case study in the Haihe River Basin, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1): 195-206.
- [4] 赛衣旦·艾力.新疆水资源承载力及用水效率评价分析[J].地下水,2021,43(1):77-80. (AILI-Saiyidan. Evaluation and analysis of water resources carrying capacity and water efficiency in Xinjiang[J]. *Ground Water*, 2021, 43(1): 77-80. (in Chinese))
- [5] 孟丽红,韦雪梅,吴绍雄,等.基于模糊综合评价模型的赣州市水资源承载力动态评价[J].数学的实践与认识,2021,51(4):300-309. (MENG Lihong, WEI Xuemei, WU Shaoxiong, et al. Dynamic assessment on water resources carrying capacity evaluation of Ganzhou city based on fuzzy comprehensive evaluation model[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2021, 51(4): 300-309. (in Chinese))
- [6] 张礼兵,胡亚南,金菊良,等.基于系统动力学的巢湖流域水资源承载力动态预测与调控[J].湖泊科学,2021,33(1):242-254. (ZHANG Libing, HU Yanan, JIN Juliang, et al. Dynamic prediction of water resources carrying capacity of Chaohu Basin and system optimization regulation based on system dynamics simulation[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(1): 242-254. (in Chinese))
- [7] 金菊良,张浩宇,陈梦璐,等.基于灰色关联度和联系数耦合的农业旱灾脆弱性评价和诊断研究[J].灾害学,2019,34(1):1-7. (JIN Juliang, ZHANG Haoyu, CHEN Menglu, et al. Evaluation and diagnosis of agricultural drought vulnerability based on grey correlation and connection number coupling[J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(1): 1-7. (in Chinese))
- [8] 金菊良,杨通竹,郦建强,等.投影寻踪方法在水资源承载力评价与预测中的应用[J].水利水运工程学报,2020(4):10-16. (JIN Juliang, YANG Tongzhu, LI Jianqiang, et al. Application of projection pursuit method in assessment and prediction of water resources carrying capacity[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(4): 10-16. (in Chinese))
- [9] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000. (ZHAO Keqin. Set pair analysis and its preliminary application[M]. Hangzhou: Zhejiang Science & Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [10] ZHANG L. Evaluation method of ecotourism carrying capacity of popular scenic spots based on set pair analysis[J]. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 2023, 26(1/2): 40.
- [11] LIU B Q, XU M, WANG J, et al. Evaluation of China's marine economic growth quality based on set pair analysis[J]. *Marine Policy*, 2021, 126: 104405.
- [12] ZHOU R X, PAN Z W, JIN J L, et al. Forewarning model of regional water resources carrying capacity based on combination

- weights and entropy principles[J]. *Entropy*, 2017, 19(11): 574.
- [13] PAN Z W, JIN J L, LI C H, et al. A connection entropy approach to water resources vulnerability analysis in a changing environment[J]. *Entropy*, 2017, 19(11): 591.
- [14] CUI Y, FENG P, JIN J L, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method[J]. *Entropy*, 2018, 20(5): 359.
- [15] JIAO S X, WANG L C, YIN Y X, et al. Evaluation of regional water utilization level based on set pair analysis[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 113/116: 1002-1006.
- [16] LU S B, SHANG Y Z, LI W. Assessment of the Tarim River Basin water resources sustainable utilization based on entropy weight set pair theory[J]. *Water Supply*, 2019, 19(3): 908-917.
- [17] 金菊良, 沈时兴, 郦建强, 等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 1-9. (JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, 39(1): 1-9. (in Chinese))
- [18] 吴凡, 陈伏龙, 丁文学, 等. 基于模糊集对分析-五元减法集对势的新疆水资源承载力评价[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 27-34. (WU Fan, CHEN Fulong, DING Wenxue, et al. Assessing water resources carrying capacity of Xinjiang using fuzzy set pair analysis and five-variable subtraction set pair potential[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(9): 27-34. (in Chinese))
- [19] 金菊良, 刘鑫, 周戎星, 等. 水资源承载力动态评价的引力减法集对势方法[J]. 水利水运工程学报, 2021(2): 38-45. (JIN Juliang, LIU Xin, ZHOU Rongxing, et al. Gravity based subtractive set pair potential method for dynamic evaluation of water resources carrying capacity[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(2): 38-45. (in Chinese))
- [20] 杨亚锋, 王红瑞, 赵伟静, 等. 水资源承载力的集对势-偏联系数评价模型[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 99-105. (YANG Yafeng, WANG Hongrui, ZHAO Weijing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on set pair potential and partial connection number[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(3): 99-105. (in Chinese))
- [21] 金菊良, 郭涵, 李征, 等. 基于水资源承载力动态评价的五元引力减法集对势方法[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 1-7. (JIN Juliang, GUO Han, LI Zheng, et al. Evaluating the dynamic carrying capacity of water resources using the five-variable gravitation subtraction set pair potential method[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(6): 1-7. (in Chinese))
- [22] 丁一波, 余又红, 李钰洁. 热传递对燃气轮机突降负载的过渡态性能影响[J]. 燃气轮机技术, 2022, 35(2): 55-59. (DING Yibo, YU Youhong, LI Yujie. Effect of heat transfer on transient performance of gas turbine with sudden load drop[J]. *Gas Turbine Technology*, 2022, 35(2): 55-59. (in Chinese))
- [23] 金菊良, 张浩宇, 宁少尉, 等. 效应全偏联系数及其在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 1-8. (JIN Juliang, ZHANG Haoyu, NING Shaowei, et al. Effect full partial connection number and its application in evaluation of regional water resources carrying capacity[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2019, 40(1): 1-8. (in Chinese))
- [24] 白露, 吴成国, 金菊良, 等. 基于 Logistic 关联分析的水资源承载力评价[J]. 人民黄河, 2019, 41(12): 43-49. (BAI Lu, WU Chengguo, JIN Juliang, et al. Logistic relational analysis method for regional water resources carrying capacity evaluation[J]. *Yellow River*, 2019, 41(12): 43-49. (in Chinese))
- [25] 董涛. 基于博弈论和五元引力减法集对势的区域水资源承载力动态评价方法[J]. 人民珠江, 2022, 43((4):): 17-22, 62. (DONG Tao. Dynamic evaluation method of water resources carrying capacity based on game theory and five-variable gravitation subtraction set pair potential[J]. *Pearl River*, 2022, 43((4):): 17-22, 62. (in Chinese))
- [26] 金菊良, 赵伟, 周戎星, 等. 联系数随机模拟模型在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 11-19. (JIN Juliang, ZHAO Wei, ZHOU Rongxing, et al. Application of random simulation model of connection number in the evaluation of regional water resources carrying capacity[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2022, 43(4): 11-19. (in Chinese))
- [27] 李辉, 金菊良, 童芳, 等. 基于联系数的安徽省水资源承载力评价及空间差异诊断分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 22-27. (LI Hui, JIN Juliang, TONG Fang, et al. Evaluation and spatial differential diagnosis analysis of water resources carrying capacity in Anhui Province based on connection number[J]. *Water Resources and Power*, 2018, 36(7): 22-27. (in Chinese))
- [28] 李征, 金菊良, 崔毅, 等. 基于半偏联系数和动态减法集对势的区域水资源承载力评价方法[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1656-1669. (LI Zheng, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Evaluation method of regional water resources carrying capacity based on semipartial connection number and dynamic subtraction set pair potential[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(5): 1656-

1669. (in Chinese))

- [29] 金菊良, 沈时兴, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 507-520. (JIN Juliang, SHEN Shixing, CUI Yi, et al. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity in the Yellow River diversion irrigation district based on semipartial subtraction set pair potential[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(5): 507-520. (in Chinese))
- [30] 金菊良, 陈磊, 陈梦璐, 等. 基于集对分析和风险矩阵的水资源承载力评价方法[J]. 人民长江, 2018, 49(7): 35-41. (JIN Juliang, CHEN Lei, CHEN Menglu, et al. Evaluation method of water resources carrying capacity based on set pair analysis and risk matrix[J]. Yangtze River, 2018, 49(7): 35-41. (in Chinese))
- [31] 金菊良, 董涛, 郦建强, 等. 不同承载标准下水资源承载力评价[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 31-39. (JIN Juliang, DONG Tao, LI Jianqiang, et al. Water resources carrying capacity evaluation method under different carrying standards[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(1): 31-39. (in Chinese))
- [32] 金菊良, 洪天求, 王文圣. 基于熵和FAHP的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 22-28. (JIN Juliang, HONG Tianqiu, WANG Wensheng. Entropy and FAHP based fuzzy comprehensive evaluation model of water resources sustaining utilization[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 22-28. (in Chinese))
- [33] 崔毅, 唐慧彦, 金菊良, 等. 基于动态差异度系数的区域水资源承载力评价与诊断[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 152-160, 177. (CUI Yi, TANG Huiyan, JIN Juliang, et al. Evaluation and diagnosis of regional water resources carrying capacity based on dynamic difference degree coefficient[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 152-160, 177. (in Chinese))

Evaluation scheme and application of regional water resources carrying capacity based on heat transfer subtraction set pair potential

WU Xiaoqin¹, WU Chengguo^{1,2}, QIN Guanghu¹, YANG Zhenlong¹, ZHAO Qiya¹, JIN Juliang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Effective evaluation of the evolution characteristics of regional water resources carrying capacity system and diagnosis of vulnerability influencing factors, introducing the idea of physical heat transfer, further deepening the concept of potential difference between deterministic items and uncertain items on the basis of set pair analysis of traditional subtraction set pair potential, and constructing an evaluation method of regional water resources carrying capacity based on heat transfer subtraction set pair potential, and an empirical application study is carried out in Jianghuai hilly area of Anhui Province. The results show that from 2011 to 2018, except Hefei, the water resources carrying capacity of other cities in Jianghuai hilly region of Anhui Province showed an overall upward trend, and the level of water resources carrying capacity in Hefei was low, and the factors such as per capita water resources, water production modulus and ecological water use rate were important fragile factors affecting the change of water resources carrying capacity in Jianghuai hilly region of Anhui Province. On the whole, the calculation and analysis results of this paper are basically consistent with those of traditional subtraction and semi-partial subtraction set pair potential, which shows that the calculation results of the water resources carrying capacity evaluation method based on heat transfer subtraction set pair potential are reasonable and effective, and further enrich and develop the rich connotation of set pair potential, which can provide a new research way for regional water resources carrying capacity evaluation and vulnerability factor identification.

Key words: evaluation of water resources carrying capacity; subtraction set pair potential; heat transfer subtraction set pair potential; Jianghuai hilly area